

文章编号: 0258-7025(2007)04-0465-05

调 Q 激光自触发斩波产生纳秒脉宽 单脉冲激光

董小刚¹, 李良钰², 晏思贤³

(¹ 中国人民解放军装甲兵工程学院光电室, 北京 100072
² 成都市科学技术局, 四川 成都 610012; ³ 清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

摘要 为利用现有装备简单获得纳秒脉宽、峰值较高的单脉冲激光, 满足军事应用和高温等离子体干涉研究的时间分辨要求, 采用专利技术优化了调 Q 脉冲激光自斩波 KDP 泡克耳斯盒电光开关的触发间隙, 解决了 19 kV 全波电压下静态绝缘阻断和调 Q 激光脉冲前沿低阈值击穿双重可靠以及全系统动作同步, 确保了触发的快捷和峰值附近斩波, 实现了从传统红宝石激光器脉宽 30 ns, 能量 80 mJ 的调 Q 激光脉冲中斩出 1.7 ns, 4 mJ 的单脉冲激光。实验和分析表明, 预处理畸化了开关电极间的场分布, 强化了激光触发作用, 保证了斩出脉冲的窄脉宽和高峰值。

关键词 激光技术; 纳秒单脉冲激光; 自触发电光开关; 耐高压绝缘薄膜

中图分类号 TN 242; O 437.1 **文献标识码** A

Producing Mono-Pulse Laser of Nanosecond Burst-Length by Cutting-Apart from Q-Beam Self-Triggered

DONG Xiao-gang¹, LI Liang-yu², YAN Si-xian³

(¹ Optoelectronic Laboratory of Academy of Armored Forces Engineering,
The Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China
² Chengdu Municipal Science and Technology Bureau, Chengdu, Sichuan 610012, China
³ Modern Applied Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract For obtaining simple mono-pulse laser of nanosecond burst-length and high peak power with available equipments in order to satisfy time-resolved demands in something to do with military application and in interferometric research of high temperature plasma, the triggered gap of KDP Pockels cell for chopping Q-beam itself was optimized by using certain patent technique, the dilemmas of dual reliability as well as synchronism of whole system were overcome in both static electric-separating of the gap enduring at full-wave voltage (V_{λ}) of 19 kV and easily puncturing of the insulating film between gap's electrodes by the low front of Q-beam self-triggering, the high-speed triggering and the chopping near the peak of Q-beam were guaranteed, and a mono-pulse laser of 1.7 ns burst-length with 4 mJ pulse energy cut apart from Q-beam of a 30 ns/80 mJ traditional ruby laser was realized. Experimental investigation and theoretical analysis indicate, the optimized pre-processing distorted the distribution of the electric field between gap's electrodes, strengthened the effect of the Q-beam's triggering, and ensured the chopped laser pulse with short duration and high power.

Key words laser technique; nanosecond mono-pulse laser; self-triggered electro-optic switch; high-voltage resistant film

1 引言

一般的调 Q 激光器输出脉宽较大, 在某些军事

战术应用和快脉冲放电高温稠密等离子体诊断等研究中, 直接用作探测光难以满足其纳秒级时间分辨的要求, 常需进一步压缩脉宽或整形。电光晶体泡

收稿日期: 2006-06-21; 收到修改稿日期: 2006-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(10035030)资助项目。

作者简介: 董小刚(1962—), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 主要从事军用光电子技术方面的研究。E-mail: dxg_yh@yahoo.com.cn

克耳斯盒是可用的斩波器件。许发明等^[1]和曾文章等^[2]采用多级电光偏转器作空间角频滤波时空变换,卢秀权等^[3]用低压 KTP 泡克耳斯盒和微带传输线进行调 Q 长脉冲整形,孟绍贤等^[4]用多级 KD*P 泡克耳斯盒的相继通断斩波再经多级放大压缩脉宽。它们均较好地实现了斩波并可在相当的范围内选控脉宽及波形,但系统需较多的专用器件和较为复杂的主动控制过程,不宜脱离实验室的装备应用和多系统的协同动作。为在实战现场数千米远程应用(需检测较弱的漫反射回波)和在高温等离子体(稠密等离子体焦点(DPF),Z 箍缩(Z-pinch)等)诊断中以纳秒级的曝光时间及 10 ns 的间隔相继采集多幅干涉图^[5~7],需保证整个系统动作同步和多次分束后时空分离^[8]的各纳秒探测光脉冲足够强(高温等离子体本身的光辐射较强)。本文仍采用调 Q 脉冲激光本身触发狭隙开关^[9],并对狭隙所夹绝缘薄膜进行了优化预处理,使电极间的场分布在边缘锐角处的奇异性得以改善,而在触发激光束作用点上高度集中与畸变^[10],既保证了静态较长时间承受 KDP 晶体全波高电压 19 kV 时关断的稳定可靠,又集中强化了触发激光的击穿作用,实现了 1.7 ns 脉宽和接近调 Q 脉冲峰值功率的激光单脉冲输出。实验和分析表明,经优化预处理触发狭隙,使调 Q 激光脉冲自触发斩波产生纳秒单脉冲激光,装置和原理简单,无需专门的电路产生主动的快脉冲控制。

2 原理和方法

纳秒斩波开关由激光触发狭隙,Blumlein 成形延时线和 KDP 电光晶体泡克耳斯盒等组成,如图 1 所示。狭隙的两个平板电极间距小于 100 μm ,以提高开通速度。为承受控制 KDP 晶体所需的 19 kV 全波高电压(对应波长 0.6943 μm),狭隙夹一厚 50 μm 的聚乙烯聚酯薄膜。前电极中心钻一直径约 1 mm 的小孔,作为触发激光的通路。静态等待时 KDP 晶体端压为 0,光开关关断,19 kV 直流高压持续加在狭隙间的薄膜上。斩波运行时,所用俄罗斯套管式抽运氙灯红宝石激光器的调 Q 激光脉冲先被 P2 反射转向,经一焦距约 50 mm 的透镜聚焦到电极小孔后的薄膜上。光强及作用积累足够时击穿薄膜(焦点处激光功率密度峰值约达 10^{12} W/mm^2),使电极短路,形成电位差的瞬间跃变,此跃变经 Blumlein 线成形延时传至 KDP 晶体处,在此不连续处阶跃波产生透射、反射,适当选择 R_0 使之与

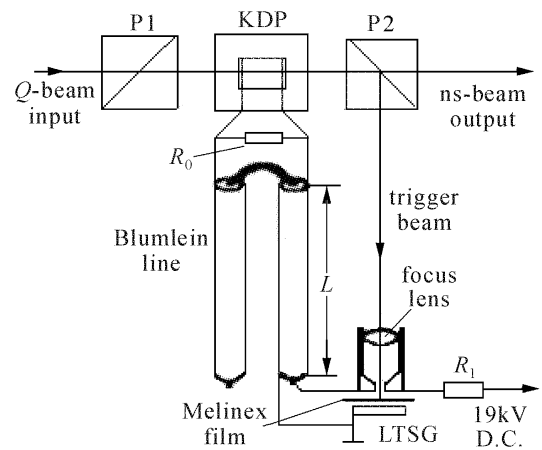


图 1 纳秒单脉冲激光斩波开关

LTSG: 激光触发开关狭隙

Fig. 1 Cutting-switch of nanosecond mono-pulse laser beam

LTSG: laser triggered spark gap

Blumlein 线的波阻抗匹配,使透反射波幅度相等,各为入射波的一半,反射波因半波损失而反相,从而使 KDP 晶体的端压瞬间从 0 跃变为 19 kV 的全波电压,维持时间的长短由 Blumlein 线的长度决定。跃变中穿过 KDP 晶体出射的激光偏振面连续旋转 180° ,在阶跃中值,激光偏振面转过 90° 的瞬间激光束透过 P2,即泡克耳斯盒瞬间开通,放过调 Q 脉冲的一小段又迅即关断并保持,从而斩出单个激光脉冲。当然每次运行都需更换狭隙开关中的耐压绝缘薄膜。因泡克耳斯盒的频率响应达 10 GHz 以上,而 Blumlein 线对信号是整体延时的,因此斩出的激光脉冲的宽度主要由电位差跃变的快慢即阶越前沿的陡度决定,脉冲的峰高决定于跃变在调 Q 激光脉冲中的位置,它依赖于触发狭隙击穿动作的快慢和时机。为此,我们应用脉冲功率技术中场畸变高速开关专利和质谱分析微取样电火花加工专利的思想及方法^[11,12],特在电极中心激光聚焦作用点的薄膜上预先制备了 1 μm 线度的半深小坑。

3 实验与讨论

图 2 是所用俄罗斯套管式抽运氙灯红宝石激光器的调 Q 激光脉冲的波形,其半峰全宽约 30 ns,脉冲能量约 80 mJ,峰值功率约 2.7 MW,薄膜上激光焦点处功率密度峰值约 10^{12} W/mm^2 。图 3 为削出的窄脉冲波形,半峰全宽约 1.7 ns。图 4 为二者的相对时间关系,皆用 HP54512B 双踪数字存储示波器采得,图 4 中小波起伏系高压电脉冲动作的干扰耦合

所致。由图可见,纳秒脉冲基本取自调 Q 脉冲峰顶附近,幅度较高,脉冲能量接近 4 mJ,为随后的装备远程应用,或多次延时分光诊断高温等离子体和干涉采图提供了可能(为便于观测,图中未严格按比例,两只光电管未严格统一标定,存储示波器两个通道的倍率也未严格调成一致)。

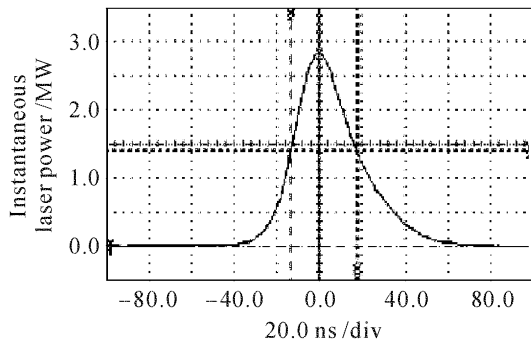


图 2 激光调 Q 脉冲波形

Fig. 2 Q-beam waveform

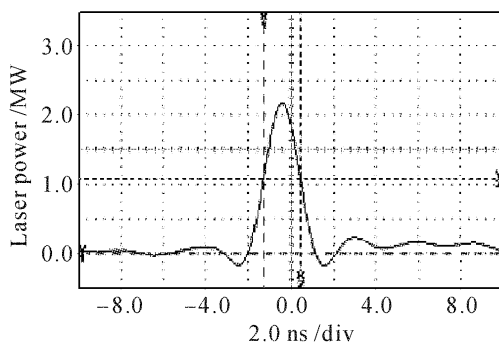


图 3 从调 Q 脉冲中削出的纳秒脉冲波形

Fig. 3 Mono-pulse laser cut apart from Q-beam

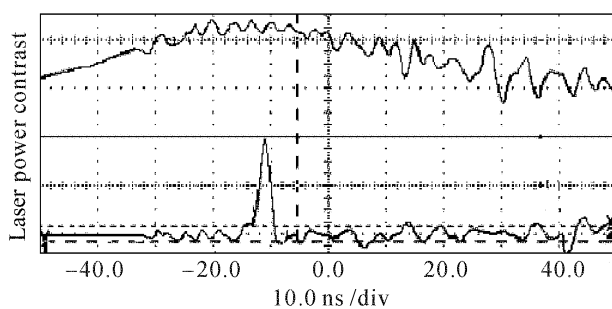


图 4 纳秒脉冲(下)与调 Q 脉冲(上)的相对时间关系

Fig. 4 Relative time between the Q-beam (upper) and the nanosecond pulse (lower)

自斩波使整个系统简化并实现了较好的同步,要满足应用,必须使斩出的激光单脉冲具有狭窄的纳秒脉宽和尽可能大的峰高,它的决定因素是薄膜击穿的快慢和时机。

实验中的薄膜击穿,既有直接的电场效应,即高频光波场与预加静态高压电场叠加,共同直接极化、电离介质,也有激光能量随时间的积累致薄膜软化、

熔融、气化而贯通,尤其在调 Q 激光减弱时。前者主要决定于瞬时激光功率密度、预加高压及薄膜性状,后者与触发激光脉冲的波形有关。鉴于激光焦点处薄膜上的瞬时激光功率密度严格的时空分布在实验上难以准确测定,因此击穿动作决定于调 Q 脉冲激光的能量和波形、薄膜的性状和预加高电压。要确切地追究四个量的相互关系,在实验及理论上都很困难,以下是该实验的做法及对结果的简要分析。

1) 将调 Q 脉冲激光按器件的可能调到较大的 80 mJ(波形也随之大致确定),以保证触发动作的实现和满足应用的需要。实测结果见图 2 及所列数据。按所采集的波形图分析,未优化处理的薄膜的击穿基本发生在瞬时激光功率 2.4 MW 附近,对应的薄膜上激光焦点处功率密度约 8×10^{11} W/mm²,接近 80 mJ 调 Q 激光脉冲的峰值。增大调 Q 激光脉冲此值基本不变,但有一定的分散。调 Q 激光脉冲峰值低于此值常也能击穿,但时机已在峰值后,甚至在调 Q 脉冲的尾部光强接近为 0 时才击穿,斩出的光强当然很弱,在应用中几乎探测不到,这应该是光能量积累导致的击穿。当氙灯老化导致调 Q 激光脉冲能量下降到 30 mJ 左右时就完全不出光了。薄膜预处理后击穿光强降到 1.1 MW,功率密度为 3.6×10^{11} W/mm² 左右,并且不再有不能击穿的情况。调 Q 脉冲激光能量下降至 10 mJ 左右(功率密度峰值降至约 10^{11} W/mm²)仍能保证可靠的击穿动作并斩出接近 0.5 mJ 的纳秒脉冲光。由于存在积累效应,击穿动作的完成不仅取决于激光瞬时功率密度,还与其时间分布(波形)相关,实验数据曾相当分散。调 Q 激光脉冲能量与波形也有一定的分散。

2) 选定 KDP 及其较高的全波电压 19 kV,使泡克耳斯盒的通、断处于此高压瞬间跃变到较为陡直的中点附近,以保证斩波的快捷。按泡克耳斯盒的动作原理,该全波电压由电光晶体的选用而较为严格地先行确定,偏高偏低都会导致开关关断不严而漏光、斩波脉宽增大,故不能随意改变。赵会良^[13]曾选用较薄的膜和较低的预高压,虽保证了高压加载的容易和斩波的提前,但致使 KDP 晶体泡克耳斯盒半开长达数十纳秒,采得的干涉图看不出任何需要的信息。

3) 选择 50 μm 厚的聚乙烯聚酯薄膜。薄膜的选取要既能加载 19 kV 的高电压并在相对较长的等待时间内可靠地承受,又要易于被调 Q 激光脉冲快速、尽早地击穿触发。鉴于空气的击穿场强仅约

3 kV/mm,有薄膜及导体界面存在时因沿面放电(爬电)而致耐压更低,且有相当大的分散性。实验中,预高压降到10 kV常也能击穿,但击穿时刻明显滞后;提升高压虽使击穿更容易,但数量关系并不确定,并导致本已如履薄冰的高压加载更雪上加霜,增加了击穿动作的分散性以及系统的相互干扰和设备的负荷。加厚薄膜或致不能击穿,或靠积累效应击穿,时间过于靠后,调Q脉冲已近尾声,造成击穿而不出光。而全波电压已较为严格地先行确定,故很少再作此类尝试。曾有过一加高压就随机击穿,分析应该是电极通光小孔边角处薄膜表面爬电不及导致电荷堆积,加剧了该处场分布的奇异性所致。故薄膜的性状如厚薄的选择以能较长时间承受19 kV的高电压为先决条件。

4) 在薄膜上激光焦点作用处预制小坑。薄膜做优化预处理后,可轻而易举地直接快速硬性加载预高压。要使斩出的纳秒脉冲峰值高,较好地处于调Q脉冲的峰顶附近,则击穿薄膜只能利用激光调Q脉冲的前半上升部分;而为使狭隙电位差的跃变理想成形,传到KDP晶体,随后再维持其上的全波电压至少后半调Q脉宽时间(本系统约20 ns),以保持光开关断开,阻止调Q脉冲的后部通过,形成单个纳秒脉冲,Blumlein成形线的半长 L 应不小于3 m,以确保电位跃变波前返回再次开启泡克耳斯盒光开关时调Q激光脉冲已结束。这也使击穿电位跃变经约10 ns后才传到泡克耳斯盒斩波,因而要求只利用距调Q激光脉冲峰约10 ns之前(光强从0增大至半峰高附近)的光脉冲部分来击穿薄膜。要使狭隙短路迅捷、提前,无疑对调Q激光脉冲的强度、波形及薄膜性状提出了相当苛刻的要求。

原系统工作曾极不可靠,使同步进行的众多其他相关操作无效,实验的失败率很高。狭隙开关电极中心激光聚焦作用点的薄膜上预置微米半深小坑后,使薄膜中的电场高度畸变,场分布高度集中于坑下而临近击穿。计算机数值模拟计算的结果如图5所示,为便于直观展示,小坑的横向线度较实际尺寸有所放大。这样,调Q脉冲前沿半峰高之前(激光功率密度约 10^{11} W/mm²)部分较小的触发激光高频场叠加作用即可灵敏快速击穿,与场畸变空气火花开关的动作机制、过程类似^[10,12]。同时电极小孔边角处较为奇异的电场分布得以平滑改善,提高了同样厚度薄膜的总体高压承受能力,使静态绝缘阻断稳定可靠。实验中近20 kV的高电压加载非常容易,调Q脉冲激光能量下降至10 mJ左右(功率密度峰

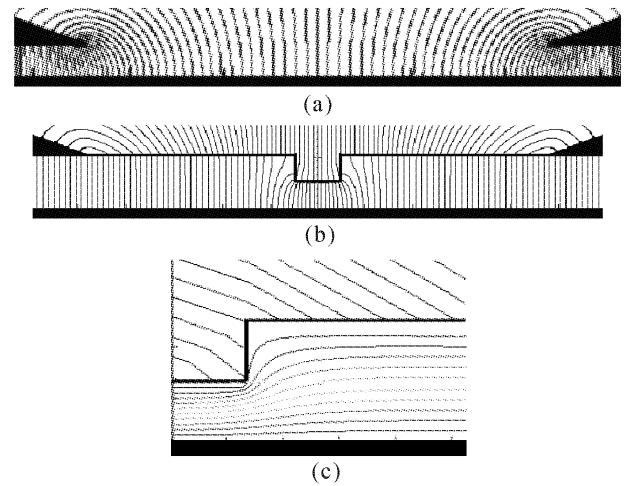


图5 狭隙开关内场分布优化预处理前后比较

(a) 预处理前的电力线分布;

(b) 预处理后的电力线分布;(c) 预处理后的等势线分布

Fig. 5 Relative time between the Q-beam (upper) and the nanosecond pulse (lower)

(a) electrolines distribution between gap's electrodes before the pre-processing; (b) electrolines distribution after the pre-processing; (c) equipotential lines distribution after the pre-processing

值降至约 10^{11} W/mm²)仍能保证可靠的击穿动作,接近0.5 mJ的纳秒脉冲激光。

4 结 论

用调Q激光脉冲自触发斩波,产生峰值较高、同步较好的纳秒单脉冲激光,无需快脉冲主动控制的专门电路,系统相对简单,易于现场尤其是军事装备应用,是相关工作切实可行的方法。虽然目前纳秒不算最快的脉冲,但对于具体诊断对象的实际显示研究和战场主动侦察探测等军事战术应用,单纳秒脉冲及对应的仅数十厘米长的波列已可完成众多的任务。比如,事实上,为满足肉眼直接观察的实时性要求,快于视暂留的变化过程的高清晰显示或过高的帧频是没有意义而不必刻意要求的。朴素而有序的纳秒单脉冲激光无疑仍有其存在的价值和实用意义,它在现代军事装备中有着相当重要而广阔的战术应用背景和实际需要。当然,在保证窄脉冲和高光强的前提下采用低电压开关元件于装备和实验现场应是继续努力的方向。

参 考 文 献

- 1 Xu Faming, Chen Shaohe, Chen Lanrong *et al.*. Pulse chopping by fast-response electro-optic deflectors [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(9):811~814

- 许发明,陈绍和,陈兰荣等.用快速电光偏转器对激光脉冲削波[J].中国激光,1996,**A23**(9):811~814
- 2 Zeng Wenzhang, Zhang Shengjia, Wei Hui *et al.*. Study of the ability to produce shaping laser pulse by using cascade electro-optic deflector in the temporal-spatial transformation instrument [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):985~988
曾文章,张生佳,韦辉等.用串接光电偏转器提高时空变换装置进行激光脉冲整形的能力[J].中国激光,2003,**30**(11):985~988
- 3 Lu Xiuquan, Chen Shaohe. A system for arbitrary shaping of Q-switch laser pulses using KTP Pockels cell and microstrip transmission line [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(8):691~695
卢秀权,陈绍和.用低压KTP普克尔盒和微带传输线进行调Q长脉冲的任意整形[J].中国激光,1999,**A26**(8):691~695
- 4 Meng Shaoxian, Gu Zhongmin, Mang Yanping *et al.*. Chopped waveshape of electrooptic gates and shorten pulses in laser amplification process [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(10):930~934
孟绍贤,谷忠民,莽燕萍等.电光开关削波和激光放大过程中的脉冲变窄[J].中国激光,1998,**A25**(10):930~934
- 5 L. Soto, H. Chuaqui, M. Skowronek. Eight-frame holographic interferometry system for transient plasma diagnostics [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(34):7831~7833
- 6 J. Meyer, H. Houtman. Multi frame interferometric study of a laser irradiated plasma in the presence of the two plasma decay instability [J]. *Physics of Fluids*, 1991, **B3**(3):745~750
- 7 Hou Xun. High Speed Projection and Photonics [M]. The progressing of modern optics and photonics, Tianjin: Tianjin Sci. & Technol. Press, 2003. 406~425
侯洵.高速摄影与光子学[M].现代光学与光子学的进展.天津:天津科技出版社,2003.406~425
- 8 Dong Xiaogang, Pu Bixia, Li Xiulan *et al.*. Real-time holography in complicated optical system for multi-frame interferometry with time-delay splitting [J]. *Journal Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2003, **43**(7):961~963
董小刚,蒲碧霞,李秀兰等.实时全息用于多幅分光延时干涉复杂光路的优势[J].清华大学学报(自然科学版),2003,**43**(7):961~963
- 9 Meng Shaoxian, Pu Chaoshun, Yang Yi *et al.*. Experimental research on laser triggered spark gaps [J]. *Journal Lasers*, 1981, **18**(4):46~47
孟绍贤,蒲朝顺,杨义等.激光触发火花隙的实验研究[J].激光,1981,**18**(4):46~47
- 10 Han Min, Guo Zhigang, Liu Kun. Impulse current generator controlled by field distortion spark gap [J]. *High Voltage Engineering*, 2000, **26**(3):42~43
韩旻,郭志刚,刘坤.场畸变火花开关控制100kA冲击电流发生器[J].高电压技术,2000,**26**(3):42~43
- 11 Wang Yuzhi, Liu Jiansheng. The manufacturing method of a tiny leak used to gas sampling with ultramicro flow [P]. Chinese Patent, 85107238, 1985
王欲知,刘建生.一种极微流量气体取样微漏孔的制造方法[P].中国专利,85107238,1985
- 12 Han Min. The field distortion gap used to the machine breaking calculus [P]. Chinese Patent, ZL92224078.7, 1992
韩旻.用于体外碎石机的场畸变火花开关[P].中国专利,ZL92224078.7,1992
- 13 Zhao Huiliang. Experimental investigation on the hold-off voltage of pseudospark device and its discharge processes [D]. Beijing: Tsinghua University, 1998. 92~104
赵会良.赝火花放电装置耐受电压及其放电过程的实验研究[D].北京:清华大学,1998.92~104